

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕДАЧИ ПРИ ИНАКТИВАЦИИ ЗЕРНА СОИ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УСТАНОВКЕ

РУДИК Феликс Яковлевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

МОРГУНОВА Наталья Львовна, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

МАКАРОВ Денис Вячеславович, ОАО НПП «Химмаши-старт»

Статья посвящена вопросам повышения эффективности технологического воздействия на сою с целью выведения из нее антипитательных веществ – ингибиторов трипсина и ферментов уреазы. Это осуществляется за счет интенсификации массопередачи при экстрагировании ультразвуковыми пульсирующими микропотоками и кавитационными схлопываниями парогазовых пузырьков с образованием окислителя пероксида водорода H_2O_2 . Разработанные технические средства обеспечивают высокие показатели инактивации и повышают производительность техпроцесса.

Введение. Создание новых технологий и технических средств для технологических воздействий на сельскохозяйственную продукцию, направленных на максимально возможное использование их потенциально-полезных свойств, обеспечивает существенное наращивание производства конечной продукции. В этом контексте особое значение отводится повышению результативности кормопроизводства, в частности добавок из зерна сои, обладающего агротехническими и полезными свойствами (см. таблицу).

Наиболее привлекательной для производства кормов является соя. При всех ее достоинствах у нее присутствуют и значительные недостатки. Высокое содержание (до 30 %) специфических белков-ингибиторов, образующих с протеолитическими ферментами животного происхождения устойчивые комплексы, снижают активность фермента. По этой причине усвояемость белка низка, что требует дополнительной обработки сои для инактивации ингибиторов и нейтрализации уреазы. Для этих целей используются различные технологии экстрагирования сои с получением полножирных и других кормов.

Цель исследований – обосновать технологические и конструктивные параметры экстрагирования аналитическими исследованиями кинетики гидродинамических процессов, ускоряемых ультразвуковыми кумулятивными пульсирующими микропотоками и схлопываниями парогазовых пузырьков.

Методика исследований. При проведении аналитических исследований за основу были приняты классические теории гидродинамики массопередачи и ультразвуковых кумулятивных колебательных движений.

Законы массопередачи и технологии, основанные на них, используют природную возможность влаги проникать во все пустоты и капилляры материала, изменять их структурные и, в некотором смысле, его биологические составляющие. В статичном состоянии процесс массопередачи протекает по замедленному варианту, когда каждая очередная зона пор и капилляр начинает омываться только после создания направления пути предыдущим омыванием. Весь процесс инерционен и длителен. Несомненно, что процесс массопередачи и ее эффективность требуют ускорения.

Характеристика основных кормовых культур

Культура		Содержание, % на сухое вещество		Урожайность, ц/га
		белок	жир	
Злаковые	Овес	12–13	4,55	22,5
	Кукуруза	15–17	5,00	55,00
	Сорго	13–14	3,50	25,00
Бобовые	Горох кормовой	25–28	1,65	30,00
	Люпин кормовой	39–40	4,80	17,05
	Нут	22–23	5,60	23,70
	Соя	40–50	18	40,00



Исследованные закономерности процесса экстрагирования при извлечении из твердого вещества антипитательных белков – ингибиторов осуществлялось путем изучения агрегатного состояния фаз, состоящих из четырех стадий:

проникновения растворителя в поры и капилляры;

растворения целевого компонента ингибитора и трипсина и уреазы;

переноса экстрагируемого вещества с поверхности раздела фаз;

переноса экстрагируемого вещества в жидкой фазе от поверхности раздела фаз.

Результаты исследований. Процесс гидродинамического проникновения и течения жидкости при массопередаче в порокапиллярной системе в нашем частном случае в зерне сои, описывается законом Пуазейля [1, 2]:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{P_{ж} r^2}{8\mu l}, \quad (1)$$

где $\frac{dl}{dt}$ – средняя скорость течения жидкости, зависящая от длины капилляра в течение времени t , м/с; $P_{ж}$ – движущее давление в перемещаемой жидкости, Па; r – радиус капилляра, м; μ – вязкость жидкости, Па·с.

Исходя из выражения (1), движущее давление $P_{ж}$ при протекании процесса массопередачи зависит, прежде всего, от размеров капилляра и вязкости проникающей жидкости и, возможно, ее окисляющей способности. На этом основании при анализе эффективности экстракции измельченной сои следует руководствоваться состоянием капиллярного давления жидкости:

$$P_{ж} = P_к - \rho g l \sin \beta, \quad (2)$$

где $P_к$ – капиллярное давление, зависящее от поверхностного натяжения жидкости, радиуса капилляра и угла смачиваемости канальцев, $P_к = \frac{2\sigma}{r} \cos \Theta$, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; l – длина капилляра, м; β – угол наклонна капилляра, град.

Растворение, перенос и вынос жидкостью растворителем ингибиторов белка и уреазы описывается диффузионными явлениями и их концентрацией в очищаемой сое и оно характеризуется уравнением градиента концентраций:

$$\text{grad } C = \frac{\partial C}{\partial n}, \quad (3)$$

где C – поле концентраций, образуется функциональной зависимостью от координат объема капилляров и времени, $C = f(x, y, z, t)$; n – направление нормали к концентрационной поверхности.

Показатель поля концентраций, в соответствии с законом Фурье, при конвективной диффузии описывает в общем виде распределения

концентраций движущейся жидкости в массообменных процессах:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - (9\text{grad})C = DV^2C, \quad (4)$$

где \vec{v} – вектор скорости; V – оператор Лапласа.

Исходя из выражения (4) следует, что граничные условия при извлечении твердой пористой фазы отличаются непрерывным увеличением области порокапиллярной системы, заполненной раствором жидкости с извлекаемым ингибитором трипсина. Очевидно, что для увеличения плотности потока рабочей жидкости и, следовательно, движущего давления в жидкости $P_{ж}$ необходимо увеличить скорость продвижения границы раздела фаз:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Ускорение процесса массопереноса акустическими кумулятивными ультразвуковыми колебаниями, как установлено многочисленными исследованиями [3–6], возможно за счет увеличения скорости диффузии. Колебательный характер динамических явлений, описанных уравнением Фика, по своей сути идентичен колебательным акустическим явлениям:

$$D = \frac{1}{3} l^2 v_o \rightarrow \frac{1}{3} A^2 f, \quad (6)$$

где l, v_o – соответственно амплитуда и частота тепловых колебательных движений жидкости, м, Гц; A, f – соответственно амплитуда и частота акустических колебательных движений жидкости, м, Гц.

В связи с тем, что функции $D(v)$ и $D(f)$ нелинейны, следует, что модуляции тепловых и акустических колебаний должны дополнять друг друга и увеличивать коэффициент диффузии. А за счет возможности многократного повышения амплитудной и частотной модуляции акустическими колебаниями можно воздействовать на скорость продвижения жидкости и, соответственно, уменьшить время, необходимое на экстрагирование ингибитора трипсина и фермента уреазы в сое. Несомненно, что при этом за счет этого микроакустические течения, создаваемые акустическими колебаниями должны существенно ускорить растворимость выводимого вещества, его последующий перенос и экстракцию. Стационарные акустические вихревые микротоки, создаваемые в пограничном к твердой поверхности слое и вблизи него, ведут к увеличению градиента скорости диффузии.

Микротоки, создаваемые акустическими колебаниями, дополняются осциллирующими парогазовыми кавитационными пузырьками, которые, в свою очередь, при изменении давления в жидкости и периода собственных колебаний,



быстро расширяясь, схлопываются. Установлено, что на эффективность растворения, переноса и выноса ингибиторов трипсина и ферментов уреазы решающее воздействие оказывает частота и интенсивность ультразвуковых колебаний. Исходя из того, что частота характеризует параметр количества колебаний, совершенных материальной точкой за период колебаний, времени совершения одного полного колебания, скорость продвижения растворителя записывается в виде

$$V = \frac{dx}{dt} = A_0 \omega_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0), \quad (7)$$

где $\frac{dx}{dt}$ – координата колеблющегося тела x в период времени t ; A_0 – амплитуда колебаний, м; ω_0 – угловая частота рад/с; ϕ_0 – начальная фаза колебаний, определяющая смещение точки в любой момент времени.

Максимальная скорость смещения материальной точки наблюдается при следующем условии:

$$\cos(\omega_0 t + \phi_0) = 1. \quad (8)$$

Особую значимость при назначении параметров озвучивания приобретает назначение верхнего и нижнего частотных уровней. Установлено, что повышенная частота колебаний препятствует созданию условий для схлопывания паровоздушного пузырька – это не дает положительного эффекта микроударного пульсирующего воздействия на колебательную систему микропотока. Низкие частоты также нежелательны, так как ведут к появлению акустического шума. В этой связи аналитически исследованы закономерности измерения площади парогазового пузырька, характеризуемой ее резонансной частотой:

$$f_p = \left(\frac{1}{2\pi R} \right) \left[\frac{3\gamma \left(P_r + \frac{2\delta}{R} \right)}{\rho} \right]^{0.5}, \quad (9)$$

где R – радиус парогазового пузырька, м; γ – показатель адиабаты, для воздуха имеет величи-

ну 1,4; P_r – давление газа в пузырьке МПа; δ – коэффициент поверхностного натяжения; ρ – средняя плотность системы кг/м³.

Заключение. Результаты аналитических исследований позволяют обосновать технологические и конструктивные параметры экстрагирования, ускоряемые ультразвуковыми кумулятивными пульсирующими микропотоками и схлопываниями парогазовых пузырьков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование. Система твердое тело – жидкость. – Л.: Химия, 1974. – 256 с.
2. Аксельруд Г.А., Молчанов А.Д. Растворение твердых веществ. – М.: Химия, 1977. – 272 с.
3. Акопян Б.В., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 224 с.
4. Рудик Ф.Я., Кодацкий Ю.А., Моргунова Н.Л. Интенсификация водной обработки зерна сои с помощью ультразвука // Научное обозрение. – 2013. – № 1. – С. 66–69.
5. Совершенствование технологии переработки сои с использованием ультразвука / Ф.Я. Рудик [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – № 2. – С. 266–286.
6. Технология и технические средства для переработки сои / Ф.Я. Рудик [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 3. – С. 91–95.

Рудик Феликс Яковлевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии продуктов питания», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

Моргунова Наталья Львовна, канд. с.-х. наук, доцент кафедры «Технологии продуктов питания», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

410005, г. Саратов, ул. Соколовая, 335.

Тел.: (8452) 69-25-32.

Макаров Денис Вячеславович, ОАО НПП «Химмаш-старт». Россия.

440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3.

Тел.: (841-2) 56-26-64.

Ключевые слова: ультразвук; интенсификация процесса; соя; корм; установка.

ANALYTICAL STUDY OF THE INTENSIFICATION OF THE MASS TRANSFER PROCESS DURING INACTIVATION OF SOYBEAN GRAIN IN AN ULTRASONIC INSTALLATION

Rudik Felix Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair “Food Technology”, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Morgunova Natalia Lvovna, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the chair “Food Technology”, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Makarov Denis Vyacheslavovich, OAO NPP “Khimmash-start”. Russia.

Keywords: ultrasound; process intensification; soy; feed.

The article is devoted to improving the effectiveness of technological impact on soy in order to remove anti-nutritional substances from it-trypsin inhibitors and urease enzymes. This is achieved by intensifying the mass transfer during extraction by ultrasonic pulsating micro-flows and cavitation with the formation of the oxidizer hydrogen peroxide H₂O₂. The developed technical means provide high inactivation rates and increase the productivity of the process.

